

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MĚŘENÍ STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLoty

MEAN RADIANT TEMPERATURE MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ TRUKSA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAN JANEČKA

BRNO 2012

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně s použitím uvedených literárních podkladů a rad vedoucího.

v Nové Vsi u Chotěboře 20.5.2012

.....

BIBLIOGRAFICKÉ CITACE

TRUKSA, L. Měření střední radiační teploty. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Janečka

ABSTRAKT

Závěrečná práce je zaměřena na parametry prostředí, především na střední radiační teplotu, která představuje parametr s dobrou vypovídající schopností. V bakalářské práci se seznámíme se způsoby měření střední radiační teploty a s vhodnými přístroji určených pro toto měření. Nedílnou součástí práce je také seznámení s faktory tepelné pohody člověka, které ji výrazně ovlivňují. V další části bakalářské práce je navržen jednoduchý snímač pro měření střední radiační teploty a jeho ověření.

ABSTRACT

This work is focused on parametry environment. In particular, this work is focused on the mean radiant temperature, which is a parameter with good meaningful capabilities. In The work we introduce with some ways mean radiant temperature measured and what are currently the sensor for this measurement. An integral part of this work is also Introduce the human thermal comfort, which plays an important role in measurement mean radiant temperature. In another part of the thesis is done propose a simple sensor for measuring the mean radiant temperature. And with other devices that are designed to measure the mean radiant temperature is verifying its functionality.

KLÍČOVÁ SLOVA

Střední radiační teplota, tepelná pohoda, kulový teploměr, měření teploty

KEYWORDS

Mean radiant temperature , thermal comfort, ball thermometer, temperature measerement

OBSAH:

	PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ.....	3
	ABSTRAKT.....	5
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	9
1	ÚVOD.....	11
2	TEPELNÁ POHODA ČLOVĚKA.....	13
2.1	Vliv prostředí na lidské zdraví.....	13
2.2	Vliv prostředí na tepelnou pohodu člověka	13
2.3	Pojem tepelná pohoda člověka	13
2.4	Faktory tepelné pohody	14
2.4.1	Teplota vzduchu.....	14
2.4.2	Střední radiační teplota.....	14
2.4.3	Absolutní vlhkost vzduchu.....	15
2.4.4	Rychlost proudění vzduchu.....	15
2.5	Hodnocení tepelného stavu prostředí	15
2.5.1	Operativní teplota.....	15
2.5.2	Ukazatelé PMV, PPD.....	16
3	STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLOTA	17
3.1	Parametr střední radiační teploty.....	17
3.2	Způsoby měření střední radiační teploty.....	17
3.3	Charakteristiky měřících přístrojů.....	17
3.4	Měření střední radiační teploty.....	18
3.4.1	Kulový teploměr.....	18
3.4.2	Princip měření kuvým teploměrem.....	19
4	SNÍMAČE STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLoty NA TRHU.....	21
4.1	Pasivní čidla teploty firmy Domat Control System s.r.o.....	21
4.2	Černý půlkulový senzor firmy Titan Products Ltd.....	22
4.3	Radiační teplotní senzor TY7321 firmy Yamatake Corporation.....	22
4.4	Snímače vhodné pro měření teploty vzduchu.....	23
4.4.1	Odporové snímače.....	23
4.4.2	Termočláňkové snímače	24
4.4.3	Digitální snímače	25
4.4.4	Termistor.....	26
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	27
5.1	Návrh jednoduchého snímače	27
5.1.1	Půlkulový snímač teploty bez nátěru.....	27
5.1.2	Půlkulový snímač teploty s nátěrem.....	28
5.2	Termogram půlkulových snímačů střední radiační teploty.....	28
5.3	Schéma pracoviště	30
5.4	Ověření teploty půlkulových teploměrů na čase.....	31
5.5	Příklad výpočtu střední radiační teploty z prvního pracoviště.....	34
5.6	Měření v kalibrační komoře	35
5.6.1	Schéma pracoviště v komoře.....	35
5.6.2	Ověřování v kalibrační komoře (půlkulový snímač teploty s nátěrem).....	36
5.6.3	Ověřování v kalibrační komoře (ASTF čidlo).....	37
5.7	Výpočet střední radiační teploty z měření v kalibrační komoře	38
6	ZÁVĚR.....	39
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	41
	PŘÍLOHY.....	43

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A	koeficient závislý na rychlosti proudění vzduchu	[-]
D	průměr kulového teploměru	[m]
h_{cg}	součinitel přestupu tepla prouděním v úrovni koule	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
h_{rg}	součinitel sálání mezi prostorem a koulí	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
PPD	procento nespokojených osob s tepelným stavem prostředí	[%]
PMV	předpověď středního tepelného pocitu	[-]
q_r	výměna tepla radiací mezi plochami prostoru a koulí	[W.m ²]
q_c	výměna tepla prouděním mezi vzduchem a koulí	[W.m ²]
R	odpor snímače při teplotě vzduchu	[Ω]
R_o	odpor snímače při teplotě 0 °C	[Ω]
t_a	teplota vzduchu	[°C]
t_o	operativní teplota	[°C]
T_g	teplota kulového teploměru	[K]
$\overline{T_r}$	střední radiační teplota	[K]
$\overline{t_r}$	střední radiační teplota	[°C]
v_a	rychlost proudění vzduchu	[m.s ⁻¹]
v_y	proudění vzduchu osa y	[m.s ⁻¹]
v_x	proudění vzduchu osa x	[m.s ⁻¹]
v_z	proudění vzduchu osa z	[m.s ⁻¹]
ε	emisní schopnost černé koule	[-]
σ	Stefan – Boltzmanova konstanta	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
α	teplotní součinitel elektrického odporu	[K ⁻¹]

1 ÚVOD

Teplo je základní fyzikální veličina, která působí na každého z nás a bez něj by náš organismus nemohl existovat. Lidské tělo dokáže v prostředí reagovat na jakoukoliv změnu tepla, ovšem s určitými rozdíly v čase i intenzitě. Reakce se liší v rychlosti, za jakou změnu člověk zaznamená, ale i ve stupni kvantity působení. Každé lidské tělo je jedinečné a reaguje na okolní teplo jinak. Určité skupině lidí může být extrémní horko, pro jiné osoby může být stejná intenzita tepla ideální a přijatelná. Lidské tělo funguje podobně jako nějaké strojové zařízení. Jestliže se změni stupeň okolního tepla, začne se chovat nestabilně. Může se zahřát díky nadměrnému teplu natolik, až dojde k přehřátí stroje a tím i k přerušení nebo úplnému zastavení jeho činnosti. Naopak při snížení teploty se musí brát v úvahu též jeho stálý chod, neboť postupným ochlazováním může jeho činnost klesat nebo se úplně zastavit. Stejným způsobem se chová i lidské tělo. Snížení nebo zvýšení tepla se projevuje v činnostech lidského těla každý den. Člověk se nachází v prostředí, ve kterém dochází k velkým změnám teplot. Na jakékoliv zvýšení nebo snížení teploty v prostředí, ve kterém se člověk nachází a koná v ní nějakou činnost, tělo reaguje rozdílně. Navíc při jakékoliv vykonávané činnosti člověk produkuje teplo, které je odváděno do prostoru, z důvodu, aby nedošlo k velkému zvýšení teploty těla. Odvod tepla však nesmí být příliš rozsáhlý, mohlo by dojít k podchlazení. V běžném prostředí by lidské tělo nemělo pocítit žádné velké teplotní výkyvy. Těmto pocitům, které člověk vnímá v prostředí, v němž se nachází, se říká tepelná pohoda člověka.

Měření střední radiační teploty je důležité při měření tepelné pohody člověka v daném prostředí, ve kterém se nachází. Tepelná pohoda člověka může být ovlivněna běžným interiérem v daném prostředí, jako jsou např. skříně, pracovní stoly či věci nacházející se na místě uživatele (počítač, televize a další). Každý z těchto předmětů vykonává nějakou činnost, tzn. přijímají anebo vydávají teplo. Tímto způsobem mohou tyto předměty působit na člověka pozitivně či negativně. V dnešní době je tato problematika neustále řešená, neboť se musí dbát na zdraví člověka v daném prostředí.

Cílem této práce je vypracovat analýzu možností měření střední radiační teploty a na jejím základě navrhnout jednoduchý snímač této teploty.

2 TEPELNÁ POHODA ČLOVĚKA

2.1 Vliv prostředí na lidské zdraví

Na člověka působí v uzavřeném prostředí celá řada faktorů, které mají vliv na pohodu a zdraví člověka. Každá místnost nebo průmyslová hala je hodnocena podle toho, jaká kvalita prostředí se uvnitř nachází. S kvalitou prostředí je spojován výskyt alergií a jiných obtíží dýchacích cest. Pokud je prostředí, kde se nachází člověk, dostatečně větrané a je zajištěno dostatečné množství čerstvého vzduchu, riziko vzniku problémů spojených s kvalitou prostředí je nízké. [15]

2.2 Vliv prostředí na tepelnou pohodu člověka

Tepelná pohoda je subjektivní pocit, který představuje aktuální stav prostředí, kde se lidská člověk vyskytuje. Nejvíce závisí na fyzikálních veličinách v daném prostředí, mezi které patří především teplota vzduchu, střední radiační teplota, absolutní vlhkost vzduchu a rychlost proudění vzduchu. K fyzikálním veličinám můžeme též zařadit druh činnosti člověka. Hranice tepelné pohody se u jednotlivých lidí liší podle jejich otužilosti či schopnosti snášet teplo nebo chlad. Velký vliv mají také izolační vlastnosti oděvu, únava, zdravotní a psychický stav člověka. Vliv tepelného prostředí na člověka se posuzuje pomocí objektivních a subjektivních ukazatelů. Jako objektivní veličina pro hodnocení tepelné pohody se zavádí operativní teplota. Optimální hodnoty operativní teploty jsou uvedeny v několika předpisech. Jako subjektivní ukazatel se používá pocit spokojenosti a nespokojenosti člověka s daným teplotním stavem (ukazatele PPD, PMV) [15, 5].

Tepelná pohoda musí splňovat tepelnou rovnováhu mezi organismem člověka a okolím. Tepelná rovnováha je výrazná tehdy, když okolí odvádí lidskému tělu tolik tepla, kolik člověk vykoná. Člověk při určitých činnostech produkuje teplo, a proto musí být zajištěn odvod produkovaného tepla do okolí tak, aby nedocházelo k neobvyklému zvýšení teploty těla. Člověk by v daném prostředí neměl cítit výrazný chlad ani výrazné teplo [15].

2.3 Pojem tepelná pohoda člověka

Tepelnou pohodu můžeme definovat několika způsoby:

- Tepelná pohoda znamená, že je dosaženo takových tepelných poměrů, kdy člověku není chladno anebo příliš teplo – člověk se cítí příjemně [15].
- Tepelná pohoda je stav mysli, jenž vyjadřuje spokojenost s teplotním klimatem, který vychází ze subjektivního hodnocení [15]

Lidské tělo si udržuje vlastní teplotu na konstantní úrovni, přičemž musí být zachována tepelná rovnováha, při níž okolí odebírá lidskému tělu tolik tepla, kolik člověk právě produkuje. Lidské tělo se umí adaptovat na různé klimatické podmínky, ale taky existuje rozmezí, ve kterém se člověk cítí nejlépe. Toto rozmezí se nazývá tepelnou pohodou. Tepelná pohoda zajišťuje vhodné prostředí pro pobyt člověka a jeho činnost při zachování optimálních hodnot jeho fyziologických parametrů [15].

Pocit tepelné pohody ovlivňují objektivní a subjektivní faktory:

Objektivní faktory:

- Teplota vzduchu
- Střední radiační teplota
- Absolutní vlhkost vzduchu
- Rychlost proudění vzduchu

Subjektivní faktory:

- Hodnota metabolismu
- Tepelný odpor oděvu

2.1 Faktory tepelné pohody

2.1.1 Teplota vzduchu

Teplota vzduchu t_a je základní veličina, která vypovídá o tepelné pohodě člověka. Je to teplota interiérového vzduchu bez vlivu sálání z okolních povrchů. Průměrnou teplotu vnitřního vzduchu lze měřit teploměrem odstíněným vůči sálání okolních ploch a vlivu oslunění. Vzhledem k lidskému organismu jsou známy optimální hodnoty teploty vzduchu. V prostorech, kde člověk odpočívá nebo vykonává jen velmi lehkou práci, je optimální teplota vzduchu mezi 18 a 22 °C. Uvedené teploty platí pro rychlost proudění vzduchu do 0,3 m.s⁻¹ a pro teploty okolních ploch jen nepatrně odlišné od teploty vzduchu. Teplota vzduchu není v celé místnosti úplně stejná. Je závislá na způsobu přívodu tepla do místnosti – otopné ploše, její povrchové teplotě, výšce místnosti a na nestejnoměrnosti ochlazování jednotlivých stavebních konstrukcí. Z hlediska tepelné pohody se sleduje i vertikální rozložení teplot vzduchu [3].

Vertikální rozdíl teploty vzduchu způsobuje místní teplotní diskomfort člověka z důvodu nerovnoměrného ochlazování nebo oteplování jednotlivých částí těla. Z tohoto hlediska se hodnotí vertikální rozdíl mezi teplotou vzduchu v úrovni hlavy a v úrovni kotníků, který by neměl být větší než 2 °K pro stojícího a 1,5 °K pro sedícího člověka [3].

2.1.2 Střední radiační teplota

Střední radiační teplota $\overline{T_r}$ je fyzikální veličina, která je definovaná jako rovnoměrná teplota pomyslného vymezeného prostoru, ve kterém se přenos tepla radiací z lidského těla rovná přenosu tepla radiací ve skutečném nerovnoměrném prostoru. V oblasti techniky prostředí se pro její měření nejvíce používá např. kulový teploměr, dva katateploměry, dvoukulový radiometr a čidlo konstantní teploty [6].

2.1.3 Absolutní vlhkost vzduchu

Absolutní vlhkost vzduchu je skutečné množství vodní páry obsažené v okolním vzduchu. Lze ji změřit přímo nebo nepřímo - měřením několika veličin současně (relativní vlhkosti a teploty vzduchu, teploty mokrého teploměru a teploty vzduchu apod.). K měření vlhkosti se obvykle používá psychrometr, ale i jiné přístroje, které zajistí požadovanou přesnost. Absolutní vlhkost vzduchu se nemusí do parametrů prostředí zařadit, pokud se pohybuje v rozmezí 30 až 70 % [3].

2.1.4 Rychlost proudění vzduchu

Rychlost vzduchu je veličina určená svou velikostí a směrem. V prostředí s tepelným působením jde o efektivní rychlost vzduchu, tj. velikost rychlosti proudu vzduchu v uvažovaném místě měření.

Obecně lze rychlost vzduchu určit:

- použitím vícesměnové sondy, která je přímo citlivá na velikost rychlosti v libovolném směru,
- použitím třisměrných čidel, které umožňují měřit složky rychlosti vzduchu ve směru tří kolmých os; označíme-li tyto tři složky v_x , v_y a v_z , pak efektivní rychlost vzduchu lze vyjádřit:

$$v_a = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)} \quad (1)$$

Přestože rychlost vzduchu obvykle značně kolísá, doporučuje se, aby tyto fluktuace byly v chladném či komfortním prostředí zaznamenány. V horkém prostředí postačuje měřit střední hodnotu [3].

2.1 Hodnocení tepelného stavu prostředí

Vliv tepelného prostředí na člověka se posuzuje pomocí objektivních a subjektivních ukazatelů. Jako objektivní veličina pro hodnocení tepelné pohody se zavádí operativní teplota t_o [°C]. Jako subjektivní ukazatel se používá pocit spokojenosti či nespokojenosti člověka s daným teplotním stavem (ukazatele PPD, PMV) [15].

2.1.1 Operativní teplota

Operativní teplota t_o je veličina, která vyjadřuje sálavou i konvekční složku sdílení tepla mezi člověkem a okolním prostředím. Operativní teplota je vypočtená teplota, která je definována jako jednotná teplota uzavřeného prostoru (tj. prostoru o stejné teplotě vzduchu i stejné radiační teplotě), černého z hlediska radiace, ve kterém by lidské tělo sdílelo konvekci i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném teplotně nesourodém prostředí [15, 5].

Operativní teplota se vypočítává z teploty vzduchu, střední radiační teploty a rychlosti proudění vzduchu. Výslednou operativní teplotu znázorníme vztahem [15]:

$$t_0 = \overline{t_r} + A.(t_a - \overline{t_r}), \quad (2)$$

kde

t_0 – operativní teplota [°C],

$\overline{t_r}$ – střední radiační teplota [°C],

t_a – teplota vzduchu [°C],

A – koeficient závislý na rychlosti proudění vzduchu, $A = 0,75w^{0,16}$.

Pokud je rychlost proudění vzduchu menší než $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ nebo je rozdíl mezi střední radiační teplotou a teplotou vzduchu menší než 4 °C , operativní teplotu lze vypočítat jako aritmetický průměr teploty vzduchu a střední radiační teploty. Při rychlostech proudění vzduchu menších než $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ lze nahradit operativní teplotu výslednou teplotou kulového teploměru t_g [°C], která se změří kulovým teploměrem a stanoví se výsledný vliv radiační teploty [15].

2.1.2 Ukazatelé PMV, PPD

Teplota je veličina velmi individuálně vnímaná a její vnímání je závislé na okamžitém zdravotním stavu i náladě člověka. Proto lze tepelnou pohodu hodnotit i subjektivně dotazováním lidí, kteří odpovídají na otázky týkající se převážně vnímání teploty, a současně se měří parametry vzduchu v místnosti. Tato metoda se používá především v interiérech obydlených lidmi při běžném provozu. Pro zjištění tepelné pohody slouží různé stupnice. Mezi dvě nejpoužívanější patří Bedfordovo měřítko a stupnice ASHRAE, které mají sedmibodovou stupnici. Srovnání stupnic je uvedeno v tabulce 1 [15].

Tab. 1 Vyjádření tepelného pocitu člověka [15].

ASHRAE	Hodnocení	Bedford
Horko	3	Velmi teplo
Teplo	2	Teplo
Tepleji	1	Příjemné teplo
Neutrálně	0	Příjemně
Chladněji	-1	Příjemně teplo
Chladno	-2	Chladno
Zima	-3	Velmi chladno

Tepelná pohoda je podmíněna tepelnou rovnováhou, avšak nezaručuje ji. Uplatňuje se zde mnoho dalších, zejména psychologických vlivů, jako jsou např. dřívější zkušenosti, adaptace na prostředí, sociálně-kulturní vlivy a zvyky.

3 STŘEDNÍ RADIAČNÍ TEPLOTA

3.1 Parametr střední radiační teploty

Střední radiační teplota nám vyjadřuje specifický problém měření teploty povrchu těles. Střední radiační teplota je parametr, který charakterizuje střední radiační teplotu povrchu ploch vyskytujících se v poloprostoru nad referenčním místem. Střední radiační teplotu označujeme jako $\overline{t_r}$ [°C] nebo $\overline{T_r}$ [K]. Střední radiační teplota je popsána jako rovnoměrná teplota pomyslného vymezeného prostoru, ve kterém se přenos radiačního tepla z lidského těla rovná přenosu radiačního tepla ve skutečném nerovnoměrném prostoru [3].

V uzavřeném prostředí, především ve velkých halách, na člověka zpravidla působí velmi nehomogenní pole tepelného zařízení. Pro takové případy vznikla veličina asymetrie radiační teploty [2].

3.2 Způsoby měření střední radiační teploty

Střední radiační teplotu můžeme měřit pomocí přístrojů, které jsou schopny integrovat celkově nerovnoměrnou radiaci z povrchů okolních ploch do střední hodnoty. K tomuto měření se obvykle využívá kulových teploměrů. Stanoví přibližnou hodnotu střední radiační teploty z měřených hodnot teploty koule, okolní teploty a rychlosti vzduchu. Přesnost měření střední radiační teploty za použití tohoto způsobu se mění v závislosti na okolním prostředí i na vlastní přesnosti měření. Střední radiační teplota je vymezena ve vztahu k lidskému tělu. U sedící osoby může kulovitý tvar teploměru napodobit se značnou aproximací tvar lidského těla. Přesnější aproximaci pro stojící i sedící osobu poskytne snímací čidlo elipsoidního tvaru [3].

3.3 Charakteristiky měřících přístrojů

Měřicí přístroje a doba ustálení snímacích čidel pro každou ze základních a odvozených veličin jsou uvedeny v [3]. Tyto charakteristiky musí být považovány za minimální požadavky. Podle potřeb, technických a výrobních možností je vždy možné specifikovat přesnější charakteristiky. Pro relativně přesné měření tepelné zátěže mohou být pro některé veličiny použity přístroje s měřicími rozsahy třídy S a s přesností C [3]. Požadavky na zařízení pro měření základních fyzikálních veličin charakterizujících prostředí třídy jsou uvedeny v tabulce 2.

Jelikož časová konstanta a doba ustálení snímacího čidla nezávisí zcela na čidle (hmotně, ploše povrchu, přítomnosti ochranného krytu), ale i na prostředí, zvláště v jeho složkách spjatých s daným měřením (rychlostí vzduchu, radiací apod.), je nutné stanovit podmínky, při nichž jsou hodnoty dosaženy. Standardní podmínky prostředí jsou uvedeny v tabulce třídy C. Musí být použity jako výchozí s výjimkou těch případů, kdy to odporuje uvažovanému principu měření veličiny [3].

Přesnost měření teploty vzduchu, střední radiační teploty, asymetrie radiační teploty, rychlosti vzduchu a vlhkosti však závisí i na vlivu jiných veličin [3].

Tab. 2 Požadavky na zařízení pro měření základních fyzikálních veličin charakterizujících prostředí třídy C [4].

Veličina	Měřicí rozsah	Nejistota měření (max.přípustná/ /doporučená)	Doba ustálení (dosažení 90 % ustálené hodnoty)
Teplota vzduchu	10 až 30 °C	$\pm 0,5 \text{ °C} / \pm 0,2 \text{ °C}$	méně než 60 s
Střední radiační teplota	10 až 40 °C	$\pm 2 \text{ °C} / \pm 0,2 \text{ °C}$	co nejkratší
Asymetrie radiační teploty	10 až 20 °C	$\pm 1 \text{ °C} / \pm 0,5 \text{ °C}$	co nejkratší
Vlhkost vzduchu	0,5 až 2,5 kPa	$\pm 0,15 \text{ kPa}$	co nejkratší
Rychlost proudění vzduchu v_a	0,05 až 1 m.s ⁻¹	$\pm (0,05 + 0,05 v_a) \text{ m.s}^{-1}$ $\pm (0,02 + 0,07 v_a) \text{ m.s}^{-1}$	1 s

3.4 Měření střední radiační teploty

Pro přesnější měření střední radiační teploty se nejvíce užívají přístroje založené na principu měření přenosu tepla zářením. Tyto přístroje se nazývají radiometry. Pro měření střední radiační teploty se nejčastěji používá kulový teploměr, dva katateploměry, dvoukulový radiometr a čidlo konstantní teploty. Pro měření radiační teploty v daném směru lze použít také radiační teploměr nebo termovizi [11].

3.4.1 Kulový teploměr

V našich podmínkách kulový teploměr patří mezi nejčastěji používané metody k měření střední radiační teploty. Kulovým teploměrem se měří teploty okolního vzduchu a anemometrem se měří rychlost vzduchu. Kulový teploměr (obr. 1) je tvořen koulí z měděného plechu o průměru obvykle 100 mm a 150 mm. Koule má matný černý povrch vytvořený elektrochemicky či nátěrem (Vernonův kulový teploměr) nebo má povrch potažený pěnovým polyuretanem (Venonův – Joklův kulový teploměr). Ve středu koule je umístěna baňka s rtuťovým teploměrem, případně jiné teplotní čidlo. Kulový teploměr nemá svůj zdroj tepla [11].



Obr. 1 Venonův - Joklův kulový teploměr.

3.4.2 Princip měření kuvým teploměrem

Černý kulový teploměr je umístěn na vyhrazeném místě v prostoru, kde se má měřit střední radiační teplota \overline{T}_r . Koule se ustálí v tepelné rovnováze účinkem výměny tepla radiací s různými zdroji tepla v prostoru a účinkem výměny tepla prouděním [3].

Teplota \overline{T}_r se určuje z teploty koule při tepelné rovnováze.

Teplotní čidlo uvnitř koule umožňuje měření střední radiační teploty koule. Ve skutečnosti teplota vnitřního povrchu koule (tenké) a teplota vzduchu vně koule (v přilehlém prostoru) se prakticky neliší od střední teploty mezní vrstvy na vnějším povrchu koule [3].

Rovnováha při výměně tepla mezi koulí a okolím je dána rovnicí [3]:

$$q_r + q_c = 0, \quad (3)$$

kde

q_r – výměna tepla radiací mezi plochami prostoru a koulí [W.m^2]

q_c – výměna tepla prouděním mezi vzduchem a koulí [W.m^2].

Přestup tepla radiací mezi plochami prostoru charakterizovaný střední radiační teplotou a koulí je vyjádřen [3]:

$$q_r = h_{rg}(\overline{T}_r^4 - T_g^4), \quad (4)$$

kde

$h_{rg} = \sigma \varepsilon$ je součinitel sálání mezi prostorem a koulí [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$],

ε – emisní schopnost černé koule,

$\sigma = 5,67 \cdot 10^8$ jako Stefan – Boltzmanova konstanta [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$],

\overline{T}_r – střední radiační teplota [K],

T_g – teplota černé koule [$^{\circ}\text{C}$].

Přestup tepla prouděním mezi vzduchem v prostoru a koulí je dán rovnicí [3]:

$$q_r = h_{cg}(T_a - T_g), \quad (5)$$

kde

h_{cg} – je součinitel přestupu tepla prouděním v úrovni koule [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$].

$$\text{V případě přirozeného proudění} \quad h_{cg} = 1,4 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

$$\text{a nuceného proudění} \quad h_{cg} = 6,3 \frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}}, \quad (7)$$

kde

D – je průměr koule [m]

v_a – rychlost vzduchu v úrovni koule [m.s^{-1}].

Součinitel přestupu tepla prouděním dává nejvyšší hodnotu u prostředí typu C. U prostředí typu S je možné použít buď tutéž metodu jako v předchozím případě, nebo – jednodušší – použít součinitel přestupu tepla při nuceném větrání přímo [3].

Teplotní rovnováha černé koule je vyjádřena:

$$h_{rg}(\overline{T_r}^4 - T_g^4) + h_{cg}(T_a - T_g) \quad (6)$$

Střední radiační teplota je vyjádřena:

$$\overline{T_r} = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{h_{rg}}(T_g - T_a)} \quad (7)$$

Při přirozeném proudění se dostane:

$$\overline{t_r} = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \times 10^8}{\varepsilon} \left(\frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (8)$$

V případě standardní koule $D = 0,15 \text{ m}$, $\varepsilon = 0,95$ (matný černý nátěr) z rovnice (8) dostaneme :

$$\overline{t_r} = \left[(t_g + 273)^4 + 0,4 \times 10^8 |t_g + t_a|^{1/4} \cdot (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (9)$$

Při nuceném proudění se dostane:

$$\overline{t_r} = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \nu_a^{0,6}}{\varepsilon x D^{0,4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (10)$$

Nebo pro standardní kouli:

$$\overline{t_r} = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \nu_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (11)$$

V praxi je tento vztah (11) používán nejčastěji pro výpočet střední radiační teploty. Platí však pouze pro standardní kouli při nuceném proudění.

4 SNÍMAČE STŘEDNÍ RADIAČNÍ TEPLoty NA TRHU

Na našem trhu se nachází velký výběr měřících přístrojů. Kromě kulového teploměru a dalších radiometrů používáme i snímače teplot. Tato kapitola pojednává o přehledu snímačů střední radiační teploty na trhu.

4.1 Pasivní čidla teploty firmy Domat Control System s.r.o.

Společnost Domat Control System s.r.o. nabízí na trhu dvě pasivní čidla teploty. Jedná se o snímače používající se k měření teploty vzduchu a sálavé teploty. Rozsah teplot je od -30 do $+75$ °C. Základní výrobky se dodávají s pasivním odporovým čidlem Pt1000. Výrobce mimo jiné uvádí, že pro tyto snímače se mohou použít čidla např.: Pt100 nebo Ni1000.



Obr. 2 ASTF Nástěnné čidlo teploty [1].



Obr. 3 RSTF Pokojové čidlo teploty [13].

4.2 Černý půlkulový senzor firmy Titan Products Ltd.

Tento snímač je určen pro měření sálavého tepla. Dodává se s čidly Pt100, Pt1000 nebo Ni1000. Jeho rozsah teplot je od - 10 do + 70 °C.



Obr. 4 Černý půlkulový senzor [2].

4.3 Radiační teplotní senzor TY7321 firmy Yamatake Corporation

Jedná se o radiační teplotní čidlo měřící infračervené záření v místnosti. Více informací o tomto produktu je uvedeno v příloze.



Obr. 5 Radiační teplotní senzor TY7321 [12].

4.4 Snímače vhodné pro měření teploty vzduchu

4.4.1 Odporové snímače

K měření teploty vzduchu ve vnitřním interiéru se používají např. odporové snímače. Jejich vysoká přesnost a stabilita je důvodem, proč se tyto snímače užívají. Do odporových snímačů patří např.:

- Platinová odporová čidla
- Niklová odporová čidla
- Termistor

Platinová odporová čidla

Platina je materiál nejčastěji užívaný k výrobě odporových snímačů. Tyto snímače se vyrábějí drátovou, tenkovrstvou nebo tlustovrstvou technologií.

Drátový měřicí senzor je tvořen spirálovitě stočeným tenkým drátkem zataveným do skla nebo keramiky. U tenkovrstvé technologie se vytváří platinový snímač na ploché korundové destičce technikou iontového leptání a napařování. Snímače vlastní rychlejší odezvu, vyšší odpor a jsou levnější [2].

Výhody:

- krátká časová odezva
- vynikající dlouhodobá teplotní stabilita
- nízký koeficient samoohřevu
- zaměnitelnost
- malé rozměry
- odolnost vůči vibracím a teplotním šokům
- vysoká spolehlivost

Na trhu se platinová odporová čidla označují zkratkou Pt, např. Pt100, Pt500 nebo Pt1000.

Pro výpočet teploty z odporu se používá tento vztah (12):

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot t_a) , \quad (12)$$

kde

R – naměřená hodnota snímačem [Ω]

R_0 – odpor platinového čidla Pt 100 [Ω]

t - vypočítaná teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]

α - teplotní součinitel elektrického odporu, $\alpha = 0,00385 \text{ [K}^{-1}\text{]}$



Obr. 8 Odporové čidlo Pt100 [10].

Niklová odporová čidla

Niklové senzory se nejčastěji vyrábějí tenkovrstvou technologií. Jejich výhodou je vysoká citlivost, rychlá časová odezva a malé rozměry. Ve srovnání s platinovými senzory trpí značnou nelinearitou, mají omezenější teplotní rozsah (používají se pro teploty do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $180\text{ }^{\circ}\text{C}$) a menší dlouhodobou stálost [8].

Výhody:

- krátká časová odezva
- vynikající dlouhodobá teplotní stabilita
- nízký koeficient samoohřevu
- malé rozměry
- zaměnitelnost
- odolnost vůči vibracím a teplotním šokům
- jednoduchá linearizace

Na trhu se niklová odporová čidla označují zkratkou Ni, např: Ni891, Ni1000 nebo Ni2226.

4.4.1 Termočláňkové snímače

Termočlánek je zdroj elektrického proudu, používaný jako čidlo teploty. Využívá principu termoelektrického jevu. Může být také používán jako zdroj elektrického proudu, ale jeho energetická účinnost a výkon jsou malé. Termoelektrické teploměry používají k měření teploty termoelektrické články. Patří mezi kontaktní snímače používané k dálkovému měření teploty [9].

Termoelektrický článek se skládá ze dvou vodičů z různých kovových materiálů A a B, které jsou na obou koncích vodičů spojeny. Tyto vodiče jsou na pevném konci a na srovnávacím konci spojeny. Na konci srovnávacího vedení je připojen na milivoltmetr. Termoelektrické napětí závisí na rozdílu teplot a měřených míst a na druhu použitých kovů pro termočlánek. Jestliže teplota jednoho spoje bude různá od teploty druhého spoje, vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud [9].

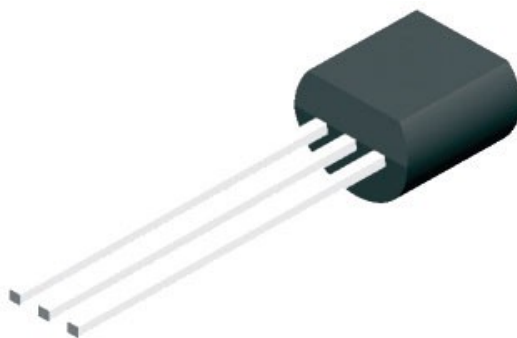
Termočlánek je k dodání v různých kombinacích kovů. Nejpoužívanější jsou J, K, T a E. Pro vysoké teploty tady jsou určeny termočláanky typu R, S, C a GB. Každý typ má jiný teplotní rozsah a pracovní podmínky, ačkoliv se maximální teplota mění dle průměru drátu použitého na termočlánek. Jelikož typ termočláanky určuje rozsah teploty, je maximum rozsahu také omezeno průměrem termočláankového drátu. To znamená, že s velmi tenkým termočláankovým drátem nelze dosáhnout plný rozsah teploty [19].



Obr. 9 Termočlánek NiCr-Ni (K) s celo-teflonovou izolací[18].

4.4.2 Digitální snímače

Pro měření střední radiční teploty existují i digitální snímače. Vhodným snímačem pro měření střední radiční teploty je snímač LM35DZ firmy National Semiconductor. Je to polovodičový snímač s úpravou výstupního signálu a s linearizací.



Obr. 10 Snímač LM35DZ firmy National Semiconductor [14].

Technické parametry:

- měřicí rozsah - 55 až 150 °C
- přesnost měření 0,2 °C
- výstupní napětí 10 mV / °C
- napájecí napětí 5 V
- časová konstanta 15 s

4.4.1 Termistor

Termistor je elektrotechnická součástka, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě. Existují dva druhy termistorů, termistor NTC a PTC.

NTC je termistor s negativním teplotním koeficientem, tzn. odpor klesá při zahřátí daného předmětu. NTC termistor se používá jako teplotní čidlo k měření teploty. Speciální NTC termistory byly součástí žhavicích obvodů elektronkových zařízení. Sloužily jako ochrana proti přepálení vláken elektronek, zapojených v sérii. NTC termistor má opačnou teplotní charakteristiku než vlákna, a proto ze začátku tlumí protékající proud. Tím umožňuje protékající proud.

PTC termistor má takovou vlastnost, že u něho odpor naopak stoupá. PTC termistor lze využít k omezení proudu obvodem, kdy průchod většího množství proudu vyvolá ohřátí součástky, které má díky tomu vyšší odpor. U termistorů se musí pracovat pouze s malými proudy (asi 50 μA), proto používá velmi citlivých měřicích přístrojů. Termistory mají velký vnitřní odpor, proto je odpor jejich přírodních vodičů zanedbatelný. Jejich vynikající velikost umožňuje téměř bodové měření teploty a spolu s vysokou citlivostí splňují tyto součástky základní nároky na miniaturizaci techniky. Jejich většímu rozšíření brání jejich časová nestabilita a za nevýhodu lze považovat značnou nelineární závislost jejich odporu na teplotě [16].



Obr. 11 Termistor typ NTC [17].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem této práce je vypracovat analýzu možností měření střední radiační teploty a na jejím základě navrhnout jednoduchý snímač této teploty a dále dle možností realizovat model snímače a ověřit jeho funkčnost.

5.1 Návrh jednoduchého snímače

Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole, existuje několik zařízení pro měření střední radiační teploty. Po zakoupení snímačů a pročtení příslušných návodů bylo zjištěno, z čeho se takový snímač na měření střední radiační teploty skládá. Z jejich složení byl vybrán materiál a čidlo, které pak bylo použito pro výrobu jednoduchého snímače. Pro jednoduchý snímač lze použít tato čidla:

- Odporové snímače
- Termočláňkové snímače
- Digitální snímače

Jednoduchý snímač se skládá z plastové desky. Její označení je (Polyetylen) PE 500 a tvoří základnu celého snímače. Plastová deska PE 500 má velmi širokou teplotní využitelnost, proto nebyl problém ji pro tento snímač použít. Další součástí snímače je polokoule. Materiál polokoule je houževnatý plast. Polokoule je uchycena na plastovou desku, kde je přímo pro polokouli vyfrézován otvor o průměru 40 mm a hloubce 2 mm. Poslední součástí snímače je čidlo teploty. Čidlo je umístěno uvnitř snímače, tedy uvnitř polokoule. Čidlo do polokoule je umístěno ze zadní části plastové desky. Uvnitř polokoule je jen ta část, která snímá okolní radiační teplotu. Aby bylo provedeno měření teploty, bylo čidlo propojeno se zařízením, které nám ukazuje výslednou hodnotu.

5.1.1 Půlkulový snímač teploty bez nátěru

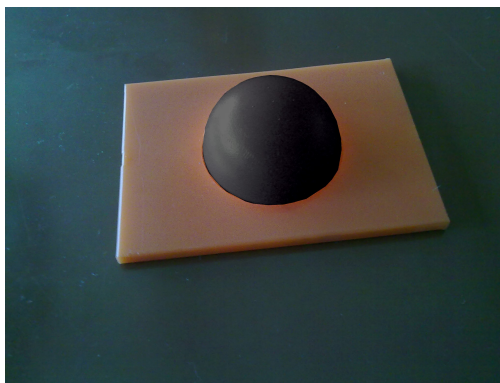
Půlkulový snímač teploty bez nátěru – jednoduchý snímač zhotovený z plastové desky PE 500. Snímač je vybaven s pasivním odporovým čidlem Pt100.



Obr. 6 Půlkulový snímač teploty bez nátěru – polokoule bez nátěru.

5.1.2 Půlkulový snímač teploty s nátěrem

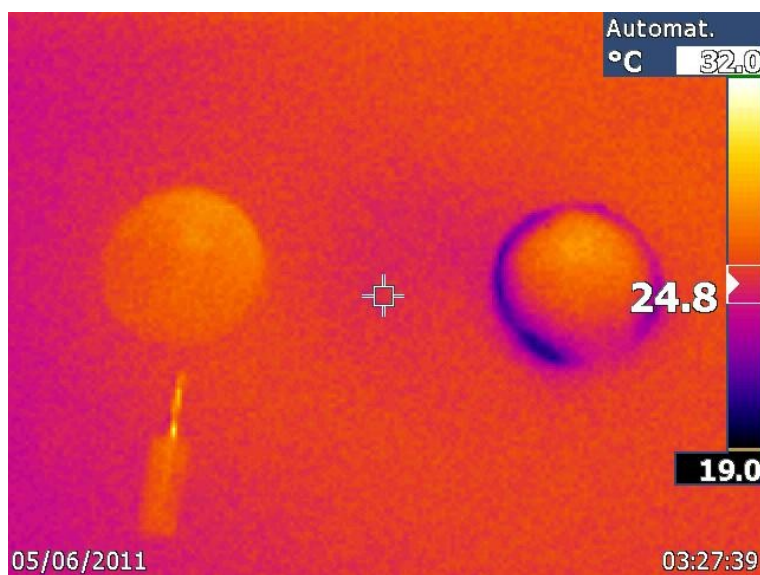
Půlkulový snímač teploty s nátěrem – jednoduchý snímač je zhotoven z plastové desky PE 500 a z plastové polokoule. Plastová polokoule se od polokoule snímače bez nátěru liší nátěrem. Snímač s nátěrem je jako snímač bez nátěru vybaven pasivním odporovým čidlem Pt100.



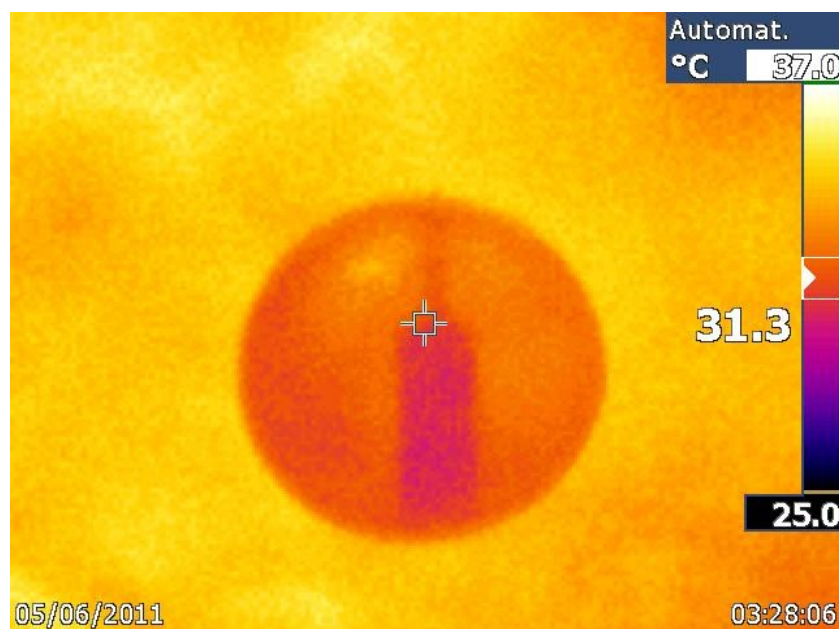
Obr. 7 Půlkulový snímač teploty s nátěrem – polokoule s nátěrem.

5.2 Termogram půlkulových snímačů střední radiační teploty

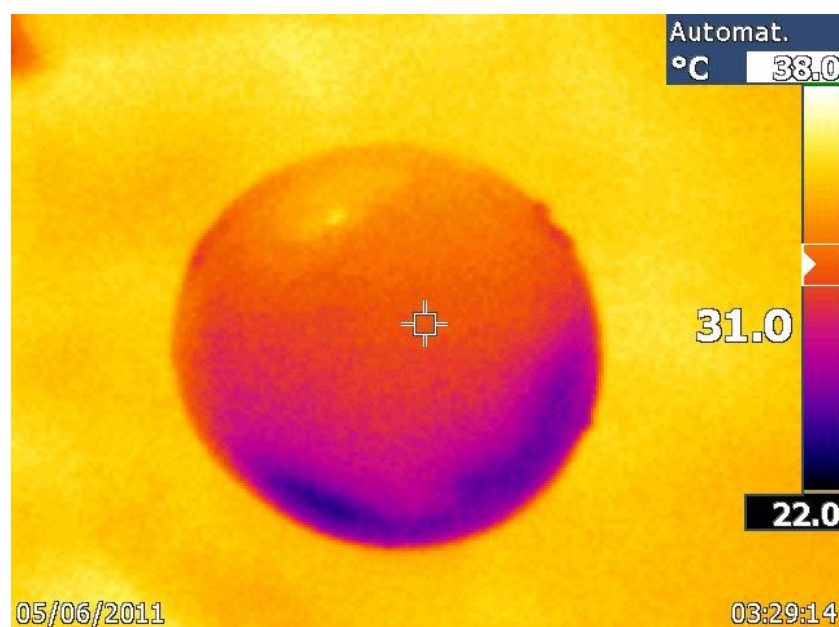
Ověření propustnosti použitého materiálu pro půlkulový teploměr i IR spektru byly naměřeny kontrolní termogramy pomocí termokamery. Jsou uvedeny na následujících obrázcích a vyplývá z nich, že půlkulový snímač teploty bez nátěru je pro IR záření částečně propustný, což dokumentuje obr. 13, ve kterém je v IR spektru viditelný předmět. Půlkulový snímač teploty s nátěrem záření naopak pohlcuje a tím se dá předpokládat, že se bude chovat podobně jako klasický kulový teploměr. Tuto skutečnost dokazuje termogram na obr. 14. Tuto skutečnost později potvrdily i výsledky experimentu, které jsou popsány v následující kapitole.



Obr. 12 Propustnost infračerveného záření půlkulového snímače teploty bez nátěru a půlkulového snímače teploty s nátěrem.

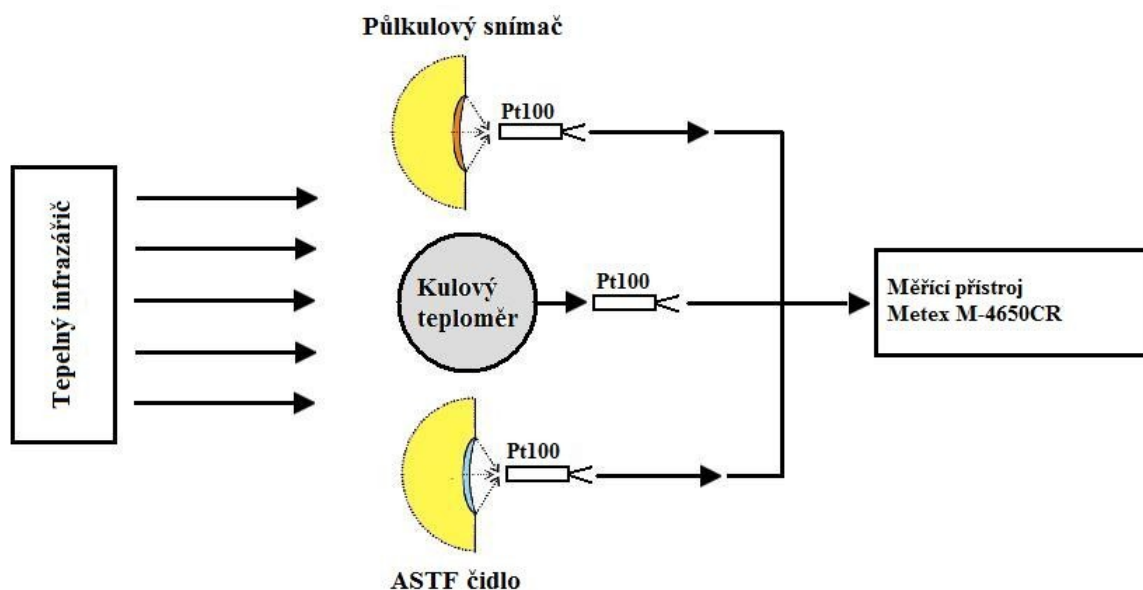


Obr. 13 Propustnost infračerveného půlkulového snímače teploty bez nátěru.



Obr. 14 Propustnost infračerveného záření půlkulového snímače teploty s nátěrem.

5.3 Schéma pracoviště



Obr. 15 Blokové schéma obvodu pro měření střední radiační teploty.

Proti vycházejícímu teplu z tepelného infrazářiče byl vystaven půlkulový snímač teploty bez nátěru nebo půlkulový snímač teploty s nátěrem, ASTF čidlo a kulový teploměr. Všechny tři zařízení byly umístěny do stejné osy. Jelikož bez nátěru a ASTF čidlo mají polokouli, byla u kulového teploměru zakryta zadní část, aby naměřené hodnoty všech tří zařízení byly stejné.

Do každého zařízení bylo umístěno platinové odporové čidlo Pt100. Čidlo bylo napojeno na měřicí zařízení Metex M-4650CR, které na displeji zobrazovalo naměřenou hodnotu v ohmech.

Aby se z naměřených hodnot určila teplota ve stupních celsia [$^{\circ}\text{C}$], byl použit vztah (12).



Obr. 16 Pracoviště.

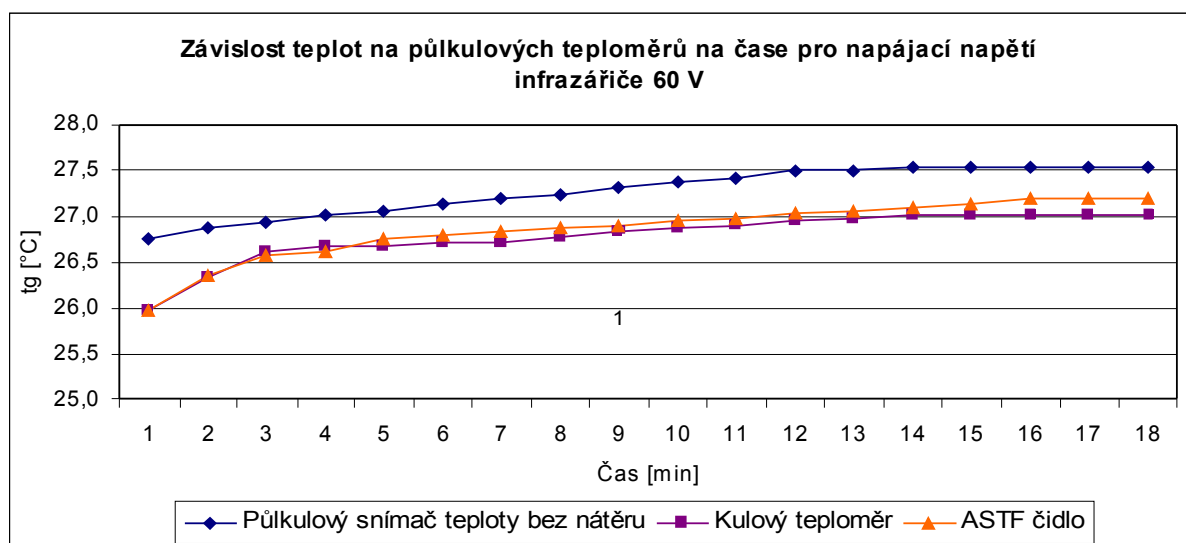
5.4 Ověření teploty půlkulových teploměrů na čase

První laboratorní měření bylo zaměřeno na funkčnost půlkulového snímače teploty a dalších přítomných snímačů a zařízení. K tomuto měření byl použit Vernonův - Joklův kulový teploměr, jež je přímo určen pro daný způsob měření střední radiační teploty. V kulovém teploměru byl umístěn snímač Pt100, který byl propojen s měřicím přístrojem.



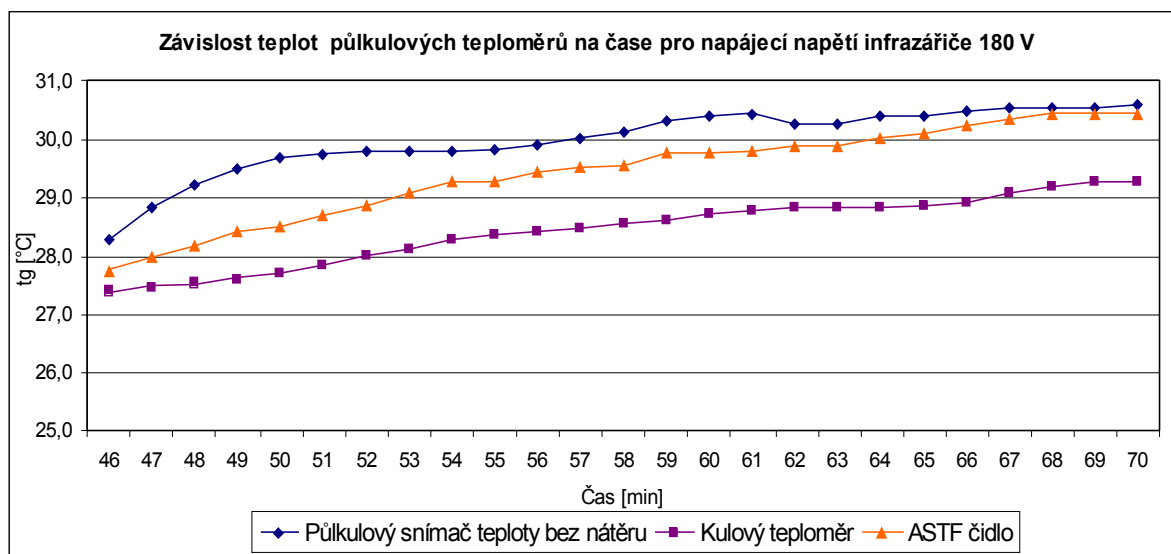
Obr. 17 Vernonův - Joklův kulový teploměr v úpravě na půlkulový – byl použit jako pracovní etalon.

K měření střední radiační teploty byl poprvé použit půlkulový snímač teploty bez nátěru a byl umístěn do stejné polohy jako kulový teploměr. Byl také použit zakoupený snímač ASTF nástěnné čidlo teploty firmy Domat Control System s.r.o. Snímače a jejich vnitřní čidla byla napojena do přístroje Metex, kterým jsme měřili odpor snímače. Vlastní měření probíhalo tak, že se do určité vzdálenosti umístil tepelný infrazářič, ke kterému byl připojen regulátor napětí. Napětí se zvyšovalo tehdy, pokud se odpor snímače ustálil na hodnotě, která se pak po určitou dobu opakovala.



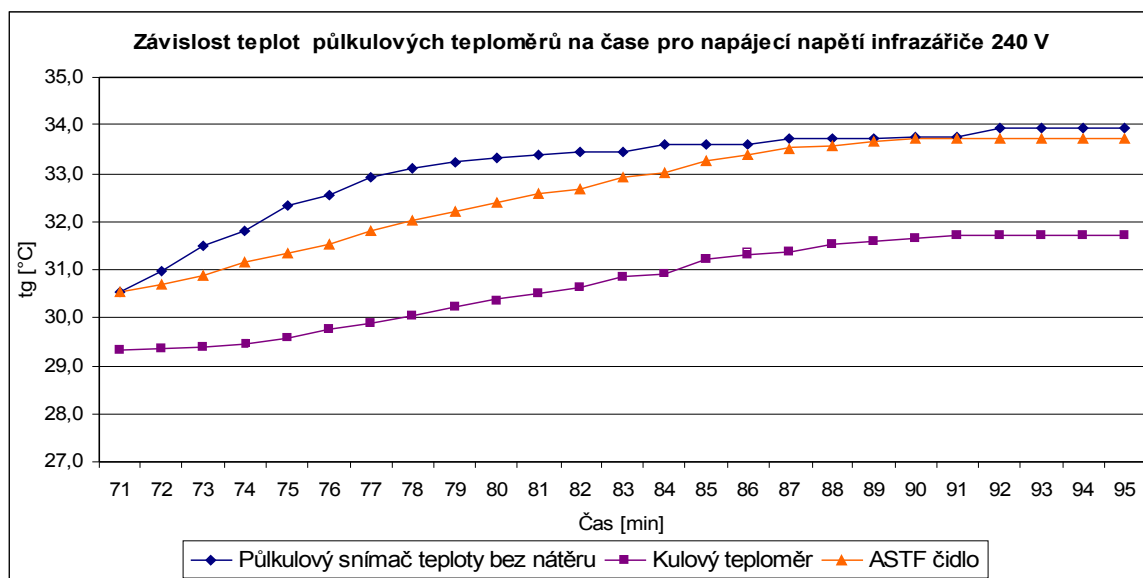
Obr. 18 Závislost teplot půlkulových teploměrů na čase pro napájecí napětí infrazářiče 60 V

První měření bylo realizováno pro napájecí napětí infrazářiče 60 V. V grafu obr. 18 si můžeme všimnout, že půlkulový snímač teploty bez nátěru vyzařující teplotu zaznamenal mnohem rychleji než ostatní zařízení. Společná teplota všech zařízení na začátku měření byla 26 °C. Z grafu vyčteme, že ostatní použítá zařízení reagují na teplotu daleko pomaleji než půlkulový snímač teploty. Nejpomaleji teplotu měřil kulový teploměr, který se ustálil až po 17 minutách. Po ustálení prvních naměřených hodnot bylo v probíhající době napájecí napětí infrazářiče zvýšeno na 180 V. Nejvíce na zvýšené napětí reagoval půlkulový snímač teploty bez nátěru, který rovnoměrně vystoupal po 38 minutách až k 30 °C. Rovnoměrně stoupal i ASTF snímač a kulový teploměr. Po 51 minutách z grafu vyčteme, že se naměřené hodnoty ve všech zařízeních ustálily.



Obr. 19 Závislost teplot půlkulových teploměrů na čase pro napájecí napětí infrazářiče 180 V.

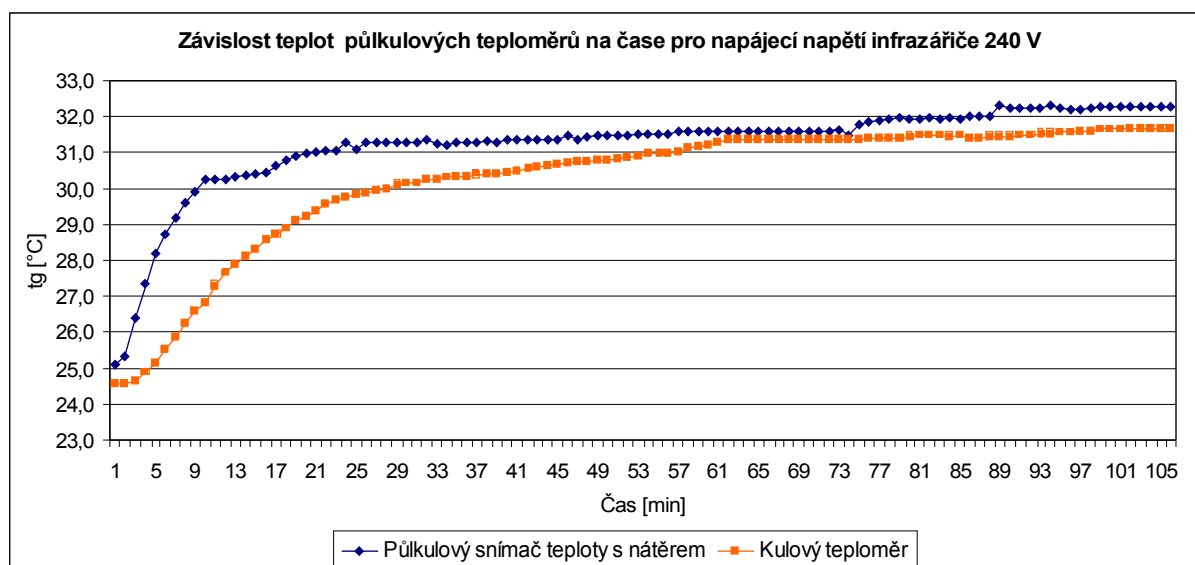
Po ustálení naměřených hodnot bylo navýšeno napětí na 240 V. Nejvíce na zvýšené napájecí napětí začal reagovat půlkulový snímač teploty bez nátěru, který rovnoměrně vystoupal během několika minut až k 33 °C a jeho naměřené hodnoty stále prudce stoupaly. Po prudkém stoupání se půlkulový snímač teploty ustálil na 34 °C. Rovnoměrně stoupaly i hodnoty ASTF čidla a kulového teploměru. Jejich hodnoty se ustálily ve stejném čase jako u půlkulového snímače teploty bez nátěru.



Obr. 20 Závislost teplot půlkulových teploměrů na čase pro napájecí napětí infrazářiče 240 V.

Třetí laboratorní měření bylo zaměřeno na testování dvou zařízení v interiérovém prostředí, kde na ně působilo napájecí napětí infrazářiče 240 V. Hodnoty kulového teploměru byly pak dosazeny do vztahu (11) a byla vypočtena střední radiační teplota. K tomuto měření jsme použili Vernonův - Joklův kulový teploměr, který je přímo určený pro tento způsob měření střední radiační teploty. V kulovém teploměru byl umístěný snímač Pt100, který byl propojen s měřicím přístrojem. Dalším zařízením byl půlkulový snímač teploty s nátěrem, ve kterém bylo též umístěno čidlo Pt100 a následně propojeno s měřicím přístrojem. Jako v minulém měření byl tepelný zářič umístěn do stejné vzdálenosti. Na regulátoru se zvolilo maximální napětí, napětí 240 V. Počáteční teplota obou zařízení před měřením byla 25 °C.

Na napětí 240 V rychle zareagoval půlkulový snímač teploty s nátěrem, který od začátku měření prudce nabýval hodnot. Během 10 minut teplota vystoupala na 30 °C, pak se na chvíli snímač ustálil. Kolem 16. minuty začaly naměřené hodnoty opět narůstat a až po 73 minutách docílily 32 °C. Snímač se do 89. minuty ustálil a posléze začaly jeho naměřené hodnoty opět stoupat. Jeho konečná teplota je 32,5 °C. Kulový teploměr na tento výkon reagoval velmi pomalu. Jeho hodnoty rostly rovnoměrně a teprve až po 41 minutách teplota vystoupala na 30,5 °C. Teplota dále rostla a ustálila se až po 98 minutách.



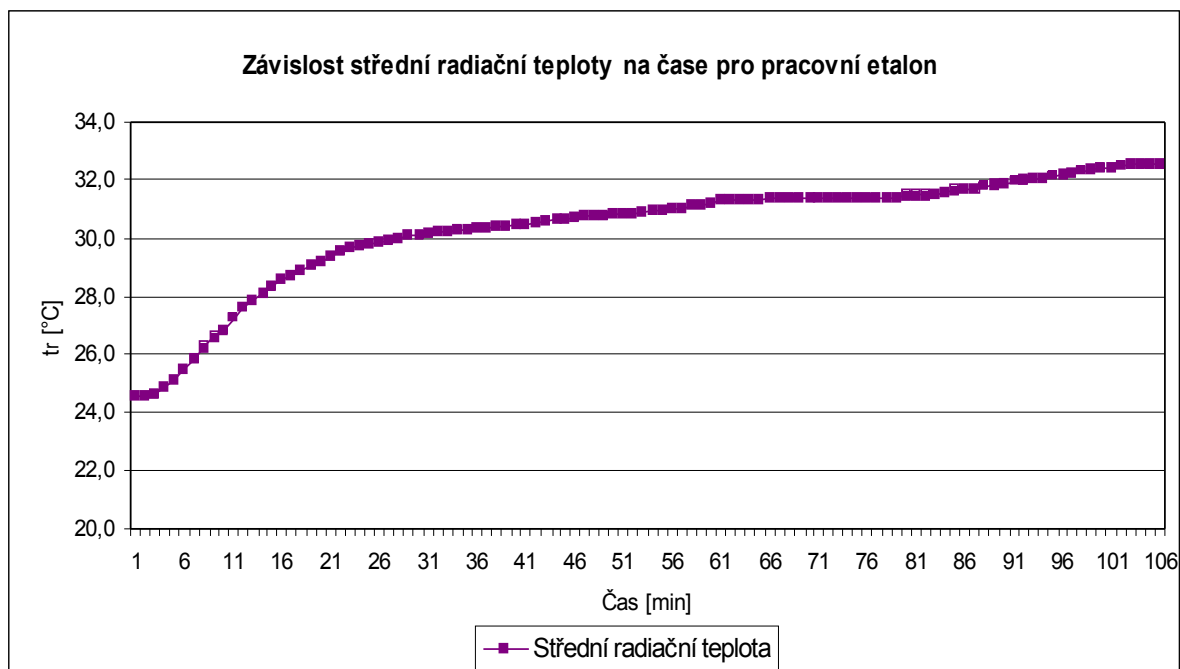
Obr. 21 Závislost teplot půlkulových teploměrů na čase pro napájecí napětí infrazářiče 240 V.

5.5 Příklad výpočtu střední radiační teploty z prvního pracoviště

Pro výpočet střední radiační teploty byla použita rovnice (11) z kapitoly 3.

$$\begin{aligned}
 \overline{t_r} &= \left[(t_g + 273)^4 + k \gamma_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 = \\
 &= \left[(t_g + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \gamma_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 = \\
 &= \left[(31,69 + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot 0,01^{0,6} (31,69 - 26) \right]^{1/4} - 273 = \\
 &= \left[(304,69)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot 0,01^{0,6} (5,69) \right]^{1/4} - 273 = \\
 &= [8618522172 + 104114271,4]^{1/4} - 273 = \\
 &= [8722636443]^{1/4} - 273 = \\
 &= 305,6060467 - 273 = \\
 \overline{t_r} &= \underline{32,6^\circ \text{C}}
 \end{aligned}$$

Konečná hodnota střední radiační teploty naměřená kulovým teploměrem byla 32,6 °C.

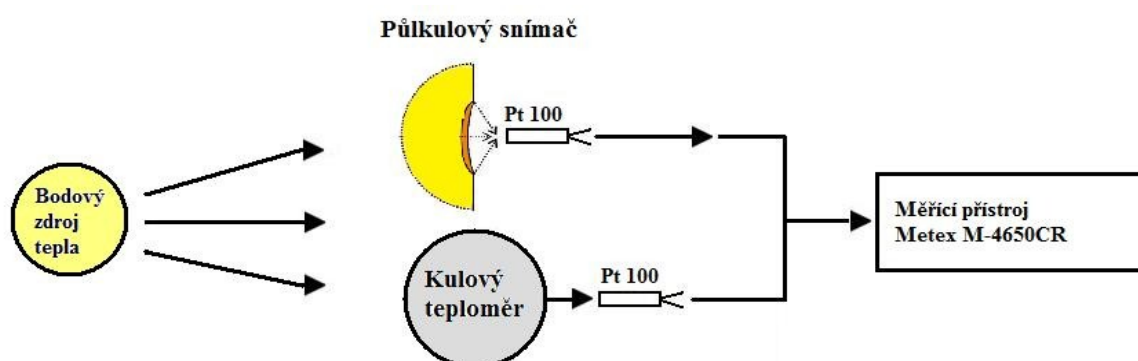


Obr. 22 Střední radiační teplota.

5.6 Měření v kalibrační komoře

Kalibrační komora slouží pro testování senzorů tepelné pohody. Je speciálně realizovaná pro možnosti objektivních testů jednotlivě vyvíjených snímačů v porovnání s ověřenými standarty. Díky této komoře máme možnost odstínit okolní faktory, které působily na prvním pracovišti, a vytvořit si relativně homogenní prostředí. Komora je vyrobena jako mobilní zařízení, na kterém lze realizovat vývoj a ověřování snímačů tepelné pohody. Komora byla navržena tak, aby bylo možné měnit všechny rozměry. Konstrukci komory tvoří 4 nastavitelné stojany, navzájem propojené tyčemi, na kterých je pověšen závěs. Závěs se skládá ze 6 kusů látky o délce 2 m a šířce 1,4 m. Závěsy jsou k sobě spojeny kolíčky. Do stojanů jsou vsunuty trubky, které jsou základem ventilátorové konstrukce [7]. Ventilátory v tomto měření nebyly použity.

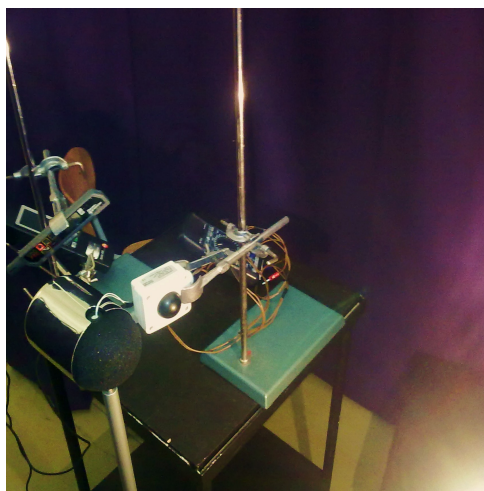
5.6.1 Schéma pracoviště v komoře



Obr. 23 Blokové schéma obvodu pro měření střední radiační teploty v kalibrační komoře.

Proti vycházejícímu bodovému zdroji tepla byl vystaven půlkulový snímač teploty s nátěrem, ASTF čidlo a kulový teploměr. Všechny zařízení byly umístěny do stejné osy. Jelikož půlkulový snímač teploty s nátěrem a ASTF čidlo mají polokouli, tak byla u kulového teploměru zakryta zadní část, jako na předešlém pracovišti, aby naměřené hodnoty všech zařízení byly stejné.

Do každého zařízení bylo umístěno platinové odporové čidlo Pt100. Čidlo bylo napojeno na měřicí zařízení Metex M-4650CR, které nám na displeji ukazovalo hodnotu v ohmech. Abychom z naměřených hodnot určili teplotu ve stupních celsia [°C], byl použit výraz (12). Na pracovišti byla také použita další zařízení pro měření vlhkosti, proudění vzduchu a teploty v celé testovací komoře.



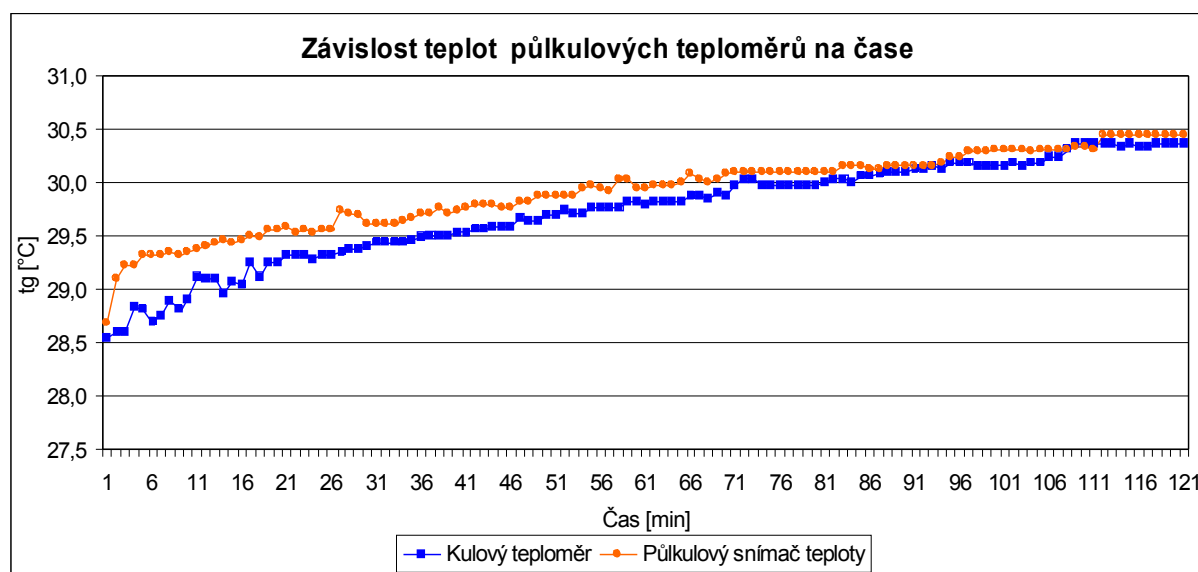
Obr. 24 Pracoviště v kalibrační komoře.

5.6.2 Ověřování v kalibrační komoře (půlkulový snímač teploty s nátěrem)

Pro první měření v kalibrační komoře jsme použili námi vyrobený půlkulový snímač teploty s nátěrem. K tomuto měření byl použit i Vernonův - Joklův kulový teploměr, jež je přímo určen pro daný způsob měření střední radiační teploty. V kulovém teploměru a v půlkulovém snímači teploty byl umístěn snímač Pt100.

Půlkulový snímač teploty s nátěrem byl umístěn do stejné polohy – osy - jako kulový teploměr. Půlkulový snímač teploty s nátěrem, kulový teploměr a jejich vnitřní čidla Pt100 byly napojeny do přístroje Metex, kterým jsme měřili odpor snímače. Hlavním zdrojem tepla byla klasická 60 watová žárovka, která byla umístěná dle schématu pracoviště před tato zařízení. V průběhu měření se vzdálenost bodového zdroje tepla neměnila.

V kalibrační komoře na tento bodový zdroj tepla rychle zareagoval půlkulový snímač teploty s nátěrem, který od začátku měření prudce nabýval hodnot. Prvních 26 minut hodnoty půlkulového snímače teploty nerovnoměrně klesaly anebo zas stoupaly až k teplotě 29,74 °C. Poté hodnoty prudce klesly a začaly rovnoměrně stoupat. Hodnoty u půlkulového snímače teploty č. 2 s černým nátěrem se ustálily na teplotě 30,44 °C. Kulový teploměr na tento bodový zdroj tepla ze začátku reagoval jako půlkulový snímač teploty č. 2. Hodnoty klesaly a stoupaly. Teprve po 18 minutách hodnoty u kulového teploměru začaly rovnoměrně stoupat. Jeho hodnoty se ustálily po 108 minutách. Konečná teplota kulového teploměru byla 30,36 °C. Celé měření je vyobrazeno na grafu obr. 25.



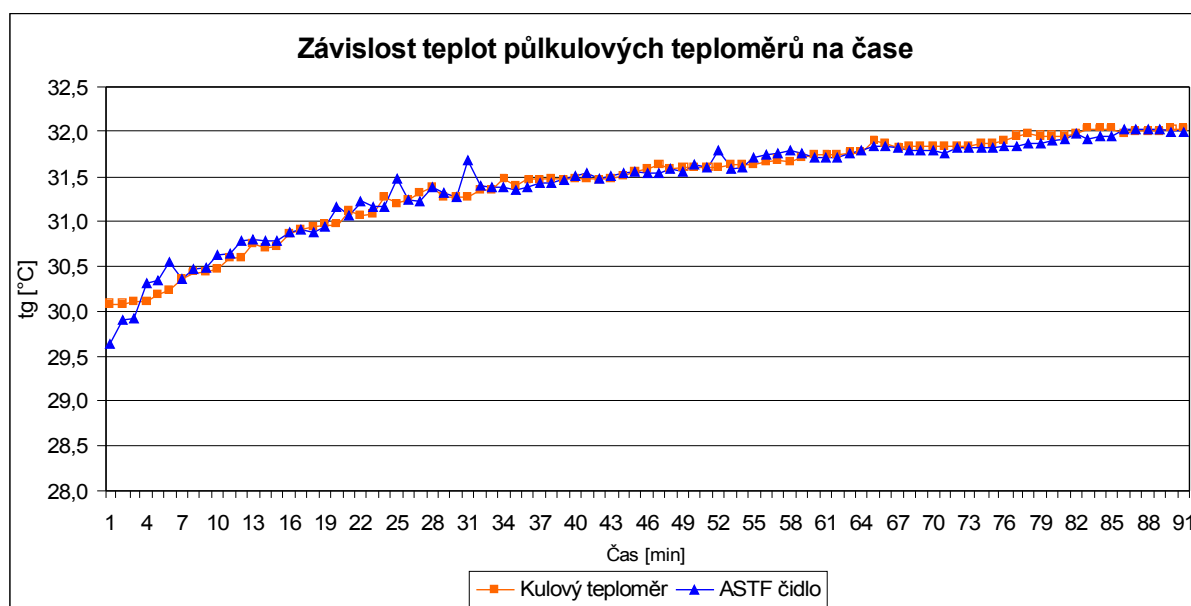
Obr. 25 Závislost teplot půlkulových teploměrů na čase.

5.6.3 Ověřování v kalibrační komoře (ASTF čidlo)

Pro druhé měření v kalibrační komoře jsme použili zakoupený snímač ASTF nástěnné čidlo teploty firmy Domat Control System s. r. o. K tomuto měření byl použit i Vernonův - Joklův kulový teploměr, který je určen pro daný způsob měření střední radiační teploty. V kulovém teploměru a ve snímači ASTF byl umístěn snímač Pt100.

ASTF snímač byl umístěn do stejné polohy - osy - jako kulový teploměr. ASTF snímač, kulový teploměr a jejich vnitřní čidla Pt100 byly napojeny do přístroje Metex, dle kterého jsme měřili odpor snímače. Hlavním zdrojem tepla byla jako u prvního měření v kalibrační komoře klasická 60 watová žárovka, která byla umístěná dle schématu pracoviště před tato zařízení. V průběhu měření se vzdálenost bodového zdroje tepla neměnila.

V kalibrační komoře ASTF snímač na tento bodový zdroj tepla docela rychle zareagoval. I když jeho počáteční hodnota byla menší než počáteční hodnota kulového teploměru, ASTF snímač po 10 minutách začal rovnoměrně stoupat a mít podobné hodnoty jako kulový teploměr. Hodnoty se ustálily na teplotě 32 °C. Kulový teploměr v druhém měření reagoval na bodový zdroj tepla pozvolna, a tak jeho hodnoty stoupaly. Hodnoty kulového teploměru se ustálily po 82 minutách. Konečná teplota kulového teploměru byla 32,02 °C. Celé měření je vyobrazeno na grafu obr. 26.



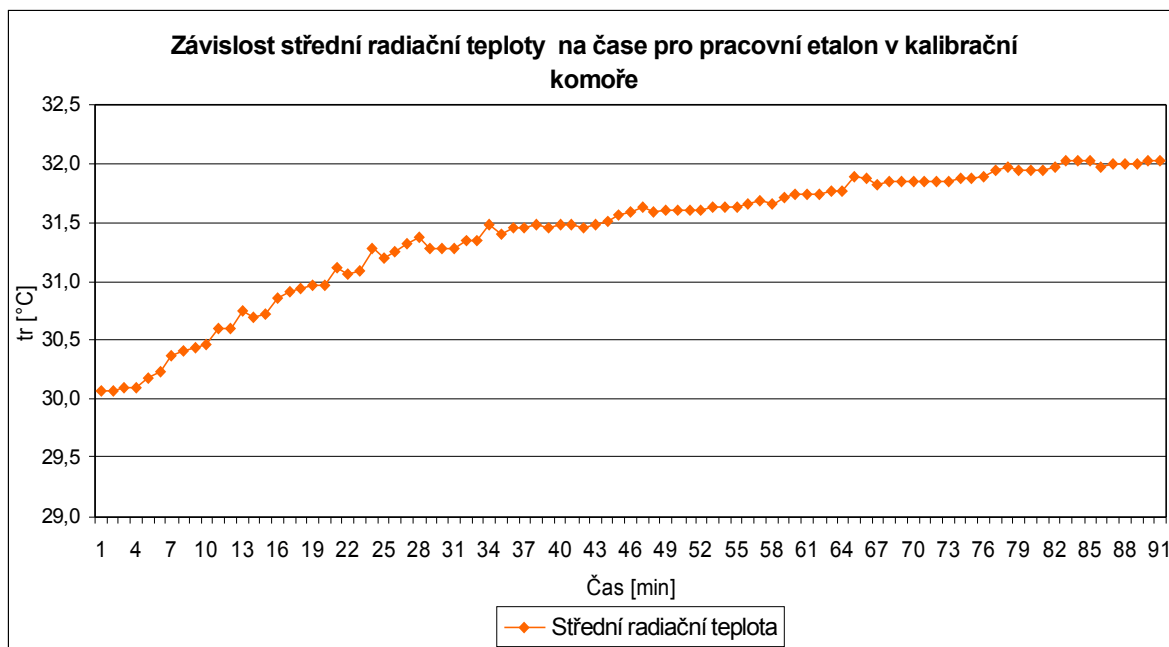
Obr. 26 Závislost teplot půlkulových teploměrů na čase.

5.7 Výpočet střední radiační teploty z měření v kalibrační komoře

Pro výpočet střední radiační teploty byla použita rovnice (11) z kapitoly 3.

$$\begin{aligned}
 \overline{t_r} &= \left[(t_g + 273)^4 + k y_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 = \\
 &= \left[(t_g + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 y_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273 = \\
 &= \left[(32,03 + 273)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot 0,01^{0,6} (32,03 - 32,01) \right]^{1/4} - 273 = \\
 &= \left[(305,03)^4 + 2,9 \cdot 10^8 \cdot 0,01^{0,6} (0,02) \right]^{1/4} - 273 = \\
 &= [8657055842 + 707458,1375]^{1/4} - 273 = \\
 &= [8657763300]^{1/4} - 273 = \\
 &= 305,0362316 - 273 = \\
 \overline{t_r} &= \underline{32,03^\circ \text{C}}
 \end{aligned}$$

Konečná hodnota střední radiační teploty naměřená kulovým teploměrem v kalibrační komoře byla 32,03 °C.



Obr. 27 Střední radiační teplota v kalibrační komoře.

6 ZÁVĚR

Měření střední radiační teploty, stejně jako dalších parametrů prostředí, řeší mimo jiné i samotné normy, např. [3], podle jejíhož doporučení je nejpoužívanějším snímačem kulový teploměr, který může mít průměr 100 mm nebo 150 mm. Nevýhodou kulového teploměru je poměrně vysoká cena, dlouhá doba nutná pro ustálení měřené veličiny a v neposlední řadě také velké rozměry tohoto snímače. Především z těchto důvodů byl proveden průzkum trhu v oblasti kulových a půlkulových snímačů střední radiační teploty, jehož výsledky jsou přehledně popsány v kapitole 4.

Na základě nastudovaných principů měření střední radiační teploty a získaných informací z průzkumu trhu byl navržen a realizován jednoduchý snímač střední radiační teploty. Navržený snímač je půlkulový, a to z důvodu plánovaného umístění na stěnu v místnosti, kdy postačuje měřit pouze poloprostor. V práci byly testovány dva typy navržených půlkulových snímačů střední radiační teploty. První byl bez nátěru a druhý s nátěrem, který měl definovanou emisivitu 0,95. Použitý nátěr také zamezil průteplivosti použitého materiálu, tzn. propouštění infračerveného záření. Tyto snímače byly následně testovány a zjišťovány jejich vlastnosti v laboratoři a později také v testovací komoře. V testech byly výsledky porovnávány s klasickým kulovým teploměrem i komerčně dodávaným snímačem firmy Domat.

První rozsáhlé sady experimentů probíhaly v otevřeném prostoru laboratoře. V laboratoři byl na stole umístěn kulový teploměr, půlkulový snímač teploty bez nátěru, popřípadě půlkulový snímač teploty s nátěrem a zakoupený půlkulový snímač od firmy Domat. Zdrojem infračerveného záření byl klasický koupelnový zářič, upravený tak, aby bylo možno regulovat jeho výkon. Výsledky těchto měření ukazují, že půlkulové snímače teploty vykazují podstatně vyšší naměřené hodnoty střední radiační teploty než ostatní zařízení. Z měření současně vyplývá, že vhodnějším snímačem je polokoule opatřená nátěrem. Obě varianty navržených snímačů se výrazně rychleji ustálily oproti Vernon-Joklovu kulovému teploměru v půlkulovém režimu měření, což je možné považovat za jejich výhodu, zvláště pokud by se uvažovalo s využitím střední radiační teploty k řízení tepelné pohody člověka.

V ustáleném stavu pak varianta snímače s nátěrem vykazovala mnohem menší a relativně stabilní odchylku oproti Vernon – Joklovu kulovému teploměru. Lze tedy předpokládat, že tato nátěrem opatřená polokoule by mohla po dokonalé kalibraci plnit funkci relativně levného a spolehlivě pracujícího snímače střední radiační teploty. Tuto kalibraci je ale potřeba realizovat v kalibrační komoře s definovanými podmínkami prostředí. U námi provedených měření v otevřeném prostoru laboratoře není možné vyloučit vlivy okolí, jako bylo například sluneční záření dopadající přes okno do laboratoře a jeho další odrazy v místnosti, nežádoucí proudění vzduchu v místnosti apod. Po konzultaci s odborníky na techniku prostředí byla v jistém směru zpochybněna i vhodnost použití plošného zdroje tepla v podobě regulovatelného infrazářiče.

Z důvodů potlačení rušivých vlivů byla druhá série měření uskutečněna v testovací komoře, aby mohla být potvrzena vhodnost navrženého polokulového snímače pro praktické nasazení. Snímače byly v komoře testovány pouze ve dvojicích, v prvním měření byly použity půlkulový snímač teploty s nátěrem a Vernon – Joklov kulový teploměr, zatímco ve druhém měření byl použit zakoupený ASTF polokulový snímač a Vernon – Joklov kulový teploměr. Jako zdroj tepla byla použita obyčejná žárovka, jejíž baňka emitující teplo se pro potřeby experimentů blížila představě bodového zdroje tepla. Z počátku měření vykazoval půlkulový snímač teploty s nátěrem výrazně s vyššími hodnotami oproti Vernon – Joklovu kulovému teploměru. Po ustálení hodnot se však konečné hodnoty obou zařízení relativně shodovaly. Stejně tomu bylo i u druhého měření se zakoupeným ASTF čidlem. Můžeme tedy říci, že v kalibrační komoře se půlkulový snímač teploty s nátěrem choval úplně jinak než tomu bylo na otevřeném testovacím pracovišti, kde působilo více okolních rušivých vlivů.

Díky definovaným podmínkám v daném prostředí lze soudit, že navržený a vyrobený půlkulový snímač teploty s nátěrem by mohl být zařazen mezi levné a spolehlivě pracující snímače střední radiační teploty. Pro potvrzení těchto závěrů by bylo ale třeba ještě podrobit snímač ověření v profesionální kalibrační komoře akreditovaného metrologického pracoviště, což je ale spojeno i s nemalými náklady. Díky provedeným testům se ale navržený snímač jeví velmi podobných parametrů jako komerčně dodávaný ASTF, proti němuž má výhodu v několikanásobně menších pořizovacích nákladech.

Závěrem lze říci, že zadání bakalářské práce bylo splněno, neboť navržený jednoduchý půlkulový snímač s nátěrem má vlastnosti požadované od snímačů pro měření střední radiační teploty. Navíc těchto srovnatelných parametrů dosahuje s nesrovnatelně nižšími náklady, čímž dává i prostor pro případnou náhradu teploty vzduchu střední radiační teplotou při regulaci tepelné pohody člověka. Jeho širší uplatnění si ale ještě vyžádá další detailnější testy, kalibrace a možná i další drobné úpravy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [2] ASTF Nástěnné čidlo teploty (polokulový teploměr). [online]. [cit. 2011-04-10].
Dostupné z: <http://products.domat-int.com/lang-sk/pasivni-cidla-teploty/179-nastenne-cidlo-teploty-polokulovy-teplomer.html>
- [3] Černé teplotní čidlo. [online]. [cit. 2011-04-13]. Dostupné z:
http://www.titanproducts.com/categories/1_134_16/Room_Temperature_Sensor_Black_Bulb.html
- [4] ČSN ISO 7726: Tepelné prostředí. Přístroje a metody měření fyzikálních veličin, Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993. s. 4-16.
- [5] HRUŠKA, Josef. Bezdotykové měření střední radiační teploty. AUTOMA, ročník 2003, č. 1, s.36-39. ISSN: 1210-9592.
- [6] CHARVÁT, T. *Studie vlivu polohy odváděcích otvorů na kvalitu vzduchu v obytné místnosti*. Brno, 2010. s. 17. Diplomová práce na fakultě Strojního inženýrství Vysoké učení technické na Ústavu energetickém. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Krejčí, Ph.D.
- [7] JANEČKA, J.; ZUTH, D.; VDOLEČEK, F. Měření střední radiační teploty. In Měření a regulace teplot v teorii a praxi. Ostrava: VŠB- TU Ostrava, 2009. s. 91-96. ISBN 978-80-87294-02- 4.
- [8] KOŠÍKOVÁ, J.; KAZKAZ, M.; JANEČKA, J.; VDOLEČEK, F.; PAVELEK, M.: TESTKOM 1; Testovací komora pro porovnávání snímačů tepelné pohody. FSI VUT, C3/ 0003. URL: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vysledkyvyzkumu/>.
- [9] Měření teploty – kovové odporové senzory teploty [on-line]. [cit. 2011-03-09].
Dostupné z: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1095-Mereni-teploty---kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [10] NOVOTNÁ, Radka. Princip termočlánku [online]. [cit. 2011-05-14].
Dostupné z: <http://referaty-seminarky.cz/princip-termoclanku/>
- [11] Odporové čidlo Pt 100. [online]. [cit. 2011-05-14].
Dostupné z: http://www.omega.com/Temperature/images/RTD-2-1PT100K2528_1.jpg
- [12] PAVELEK, Milan; ŠTĚTINA, Josef.: *Experimentální metoda v technice měření*, 1. vyd., Brno : Akademické nakladatelství cerm 2007, s. 76-77. ISBN 978-80-214-3426-4.
- [13] Radiační teplotní senzor TY7321. [online]. [cit. 2011-04-13].
Dostupné z: <http://www.azbil.com/products/bi/ba/ss/AB-5361.pdf>
- [14] RSTF Pokojové čidlo teploty (polokulový teploměr). [online]. [cit. 2011-04-10].
Dostupné z: <http://products.domat-int.com/lang-sk/pasivni-cidla-teploty/180-pokojove-cidlo-teplotypolokulovy-teplomer.html>
- [15] Snímač teploty LM35DZ firmy National Semiconductor. [online]. [cit. 2011-05-13].
Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/sn%C3%ADma%C4%8D-teploty-to-92/national-semiconductor/lm35dz-nopb/641527>

- [16] ŠANCOVÁ, Lucie. Vliv teploty vzduchu a povrchové teploty na tepelnou pohodu člověka [online]. [cit. 2011-03-08].
Dostupné z: <http://www.setrnebudovy.cz/component/content/article/10>
- [17] Termistor. [online]. [cit. 2011-05-16].
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Termistor>
- [18] Termistor typ NTC. [online]. [cit. 2011-05-16].
Dostupné z: <http://cz.farnell.com/epcos/b57236s0160m000/thermistor-ntc-icl-16r/dp/1843296>
- [19] Termočlánek. [online]. [cit. 2011-05-16].
Dostupné z: <http://www.meteostanice.cz/zbozi/3512/Termoclanek-NiCr-Ni--K--s-celo-teflonovou-izolaci.htm>
- [20] Úvod do termočlánků. [online]. [cit. 2011-05-14].
Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>

PŘÍLOHY

Součástí této práce je CD obsahující:

- Bakalářská práce ve formátu Adobe Acrobat (PDF)
- Technická dokumentace radiačního teplotního senzoru TY7321
- Technická dokumentace černého půlkulového senzoru